УДК 519.718.2

И. В. Быстрова, Б. П. Подкопаев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

Функциональное диагностирование сетей из цифровых автоматов состояний

Аннотация. *Рассмотрена задача функционального диагностирования цифровых устройств, образующих сеть из автоматов состояний. Предполагается, что эта задача для компонентов сети решена и соответствующие средства диагностирования для них построены. Показана возможность преобразования их совокупности в средства диагностирования всей сети, причем результат преобразования при наличии ограничений на число компонентов с ошибками упрощается по сравнению с исходной совокупностью. Предложена процедура, позволяющая для наиболее вероятного случая локализации ошибок (все ошибки сосредоточены в некотором компоненте сети) найти аналитические выражения, задающие вспомогательный контрольный автомат и дискриминатор ошибок. В первой части статьи решение задачи функционального диагностирования дано для случая, когда функции соответствия всех компонентов скалярны, а класс обнаруживаемых ошибок задан единичной кратностью. Далее результат обобщается для случая векторных функций, при котором возможно появление многократных ошибок. Процедура минимизирует искомые устройства функционального диагностирования по критерию порядка при сохранении исходной обнаруживающей способности в рамках любого компонента сети. Полученные результаты иллюстрируются примером построения средств функционального диагностирования для устройства обработки дальномерного сигнала широкополосной радиотехнической системы ближней навигации.*

Ключевые слова: объект диагностирования, средства функционального диагностирования, сеть из автоматов, вектор состояний, обнаружение ошибок, контрольный автомат, дискриминатор ошибок, функция соответствия, решающая функция

Для цитирования: Быстрова И. В., Подкопаев Б. П. Функциональное диагностирование сетей из цифровых автоматов состояний // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 2. С. 12–19.

I. V. Bystrova, B. P. Podkopaev
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

Functional Diagnosis of Digital State Automation Networks

Abstract. *The problem of functional diagnosis of digital devices forming a network of state automata is considered. This task for the network components is supposed to be solved, and the corresponding diagnostic devices for them are provided. The possibility of their population transformation into the tools for the entire network diagnostics is shown. The result of the transformation with the restrictions on the number of components with errors is simplified in compare with the original population. A procedure is proposed allowing to find analytical expressions defining an auxiliary control and an error discriminator for the most probable case of error localization (all errors are concentrated in a certain component of the network). The first part of the article provides a solution of the functional diagnosis problem for the case when the parity functions of all components are scalar, and the class of detectable errors is given by unit multiplicity. Next, the result generalizes for the case of vector functions, where multiple errors can occur. The procedure minimizes the sought for functional diagnosis devices with respect to the order when preserving the initial detecting ability within any network component. The obtained results are illustrated by an example of construction of functional diagnosis equipment for ranging signal processing device in broadband short-range radio engineering navigation system.*

Key words: Diagnostic object, devices of functional diagnosis, network of automates, state vector, error detection, control automate, error discriminator, function of conformity, decision function

For citation: Bystrova I. V., Podkopaev B. P. Functional Diagnosis of Digital State Automation Networks. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2018, no. 2, pp. 12–19. (In Russian)

Введение. В современных радиолокационных и радионавигационных системах для решения большинства задач (генерация и обработка сигналов, управление обзором пространства, адаптация параметров к конкретной помеховой обстановке, построение траекторий подвижных объектов и т. п.) используются средства цифровой техники. С позиций математической теории систем их совокупность представляет собой некоторую сеть, состоящую из конечных автоматов [1]. Высокие требования к качеству выходной информации таких систем определяют необходимость повышения достоверности функционирования всех устройств в их составе, поскольку неверная работа хотя бы одного из них может привести к потере целостности указанной информации.

Эффективным способом повышения упомянутой достоверности является введение в состав технических объектов средств функционального диагностирования (ФД). Последние позволяют обнаруживать ошибки в работе оборудования в реальном времени, предотвращая наступление нежелательных последствий [2]–[5].

Если сеть задана аналитически, синтезировать для нее устройство ФД можно, используя положения алгебраической теории ФД динамических систем [6]–[8]. Однако в большинстве случаев решить диагностическую задачу таким способом не удается по двум причинам. Во-первых, в технической документации на объект диагностирования его аналитическое описание, как правило, отсутствует. Обычно известны только функциональные схемы входящих в объект устройств, преобразование которых в аналитическую форму является достаточно трудоемкой задачей. Во-вторых, для сложных объектов, а именно к таким относятся рассматриваемые сети, вступает в силу так называемое проклятие размерности, состоящее в катастрофическом увеличении вычислительной сложности синтеза. В результате поиск решения с помощью типовых персональных ЭВМ либо невозможен, либо требует неприемлемых временны́х затрат [9], [10].

Указанные трудности объясняют, почему на практике, разрабатывая средства ФД для сети, их находят для всех ее компонентов независимо, считая полученную совокупность искомым решением. При этом гарантируется обнаружение ошибок, распределенных по сети произвольным образом, в том числе и искажающих результаты работы всех компонентов одновременно. Кроме того, компоненты, в которых произошли ошибки, легко локализуются. Однако во многих случаях полученное решение оказывается избыточным, поскольку вероятность одновременного появления ошибок в нескольких компонентах мала, а их локализация в рабочем режиме не требуется. Применительно к таким случаям в настоящей статье предложены методы синтеза средств ФД для произвольных сетей из автоматов состояний, позволяющие по сравнению с традиционными методами снизить вводимую избыточность.

Постановка задачи. Пусть дана некоторая сеть, состоящая из n цифровых автоматов (ЦА) состояний, т. е. автоматов без выходного логического преобразователя (рис. 1). Такая сеть также является автоматом состояний, поэтому может быть задана тройкой вида $S = (X, Q, \delta)$, где $X = \{x\}$ – множество входов; $Q = \{q\}$ – множество состояний; δ – функция переходов сети [1]. Каждый ЦА, входящий в сеть, в свою очередь, характеризуется аналогичной тройкой $A_i = (X_i, Q_i, \delta_i)$, $i = \overline{1, n}$. Отметим, что в настоящей статье элементы всех множеств суть двоичные векторы.

Положим, что для каждого ЦА A_i сети в соответствии с базовой формой ФД [6] оптимальным образом построены средства диагностирования, т. е. образована структура (рис. 2), включающая в себя объект диагностирования $A_i = (X_i, Q_i, \delta_i)$, контрольный автомат (КА) состояний $A_{\text{К}i} = (X_{\text{К}i}, Q_{\text{К}i}, \delta_{\text{К}i})$ и дискриминатор ошибок D_i, состоящий из двух узлов: вычислителя в общем случае векторной функции соответствия r_i и устройства сравнения $\otimes$, на выходе которого формируется сигнал ошибки ε_i.

Рассматривая представленную структуру, следует отметить три момента. Во-первых, в общем случае множество входов КА $A_{\text{К}i}$ есть подмножество декартового произведения $X_i \times Q_i$, в

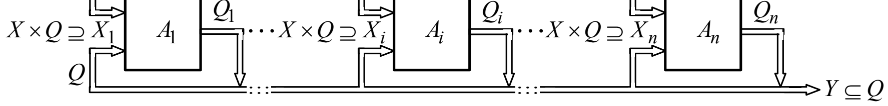

Рис. 1

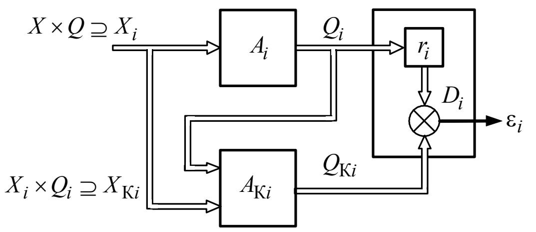

Рис. 2

котором $X_i \subseteq X \times Q$, из чего следует, что $X_{Ki} \subseteq X \times Q \times Q_i$, а функция переходов δ_{Ki} есть функция трех аргументов $x \in X$, $q \in Q$ и $q_i \in Q_i$. Во-вторых, размерности функции r_i и векторов из Q_{Ki} равны. В-третьих, в дискриминаторе D_i вычисляется текущее значение сложной бинарной решающей функции $\varepsilon_i\left[r_i(q_i), q_{Ki}\right]$, равное нулю при отсутствии ошибок заданного класса и единице – при их наличии.

Считая, что в конкретный момент времени ошибки могут произойти в любом, но единственном компоненте сети, найдем обнаруживающие их средства диагностирования применительно к рассмотренной структуре ФД (рис. 2). Используя совокупность известных КА и дискриминаторов ошибок компонентов, нужно синтезировать КА $A_K = \left(X_K, Q_K, \delta_K\right)$ и дискриминатор ошибок D для всей сети, оптимизируя решение по критерию порядка [6].

Решение задачи ФД. Решение поставленной задачи естественным образом разбивается на несколько этапов:

1. Определение реализуемой в D решающей функции $\varepsilon\left[r(q), q_K\right]$.

2. Выделение из решающей функции $\varepsilon\left[r(q), q_K\right]$ функции соответствия $r(q)$ для всей сети.

3. Выбор типа КА A_K и параметров его блока памяти.

4. Поиск функции переходов $\delta_K\left(x_K, q_K\right)$. КА A_K, обеспечивающей его синхронную работу с сетью S.

5. Детализация структуры дискриминатора ошибок.

Определяя решающую функцию, следует руководствоваться рядом соображений. Во-первых, она должна принимать единичное значение при появлении ошибки в любом компоненте сети, т. е. при единичном значении любой функции $\varepsilon_i\left[r_i(q_i), q_{Ki}\right]$, $i = \overline{1, n}$. Во-вторых, из нее должна выделяться функция соответствия $r(q)$, что возможно только тогда, когда возможно представление $\varepsilon\left[r(q), q_K\right]$ в виде разделимой декомпозиции по q и q_K. В-третьих, принятая постановка задачи требует отсутствия в выражении для решающей функции сети переменных q_{Ki}.

Положим для простоты, что все функции соответствия $r_i(q_i)$ скалярны, т. е. $r_i(q_i) \in \{0, 1\}$. Такая ситуация имеет место, если ошибки каждого компонента сети заданы списком, позволяющим разбить множество его состояний на два блока так, чтобы правильные и ошибочные состояния находились в разных блоках. При этом функция $r_i(q_i) = q_{Ki}$ и порождает указанное двухблочное разбиение, причем q_{Ki} является одноразрядным вектором, а мощность множества Q_{Ki} равна двум $\left(\#Q_{Ki} = 2\right)$. В частном случае это соответствует обнаружению однократных ошибок в ЦА контролем по четности [9].

При введенных ограничениях решающие функции всех компонентов имеют вид

$$\varepsilon_i\left[r_i(q_i), q_{Ki}\right] = r_i(q_i) \oplus q_{Ki}.$$

Используя их, получить решающую функцию сети, принимающую единичное значение в случае наличия ошибки в одном из компонентов, можно тремя способами: суммированием по модулю два, объединением по "ИЛИ" и с помощью операции "исключающее ИЛИ". В первом случае функция вида

$$\varepsilon\left[r(q),\ q_K\right] = \bigoplus_{i=1}^{n}\left[r_i(q_i) \oplus q_{Ki}\right] = \left[\bigoplus_{i=1}^{n} r_i(q_i)\right] \oplus \left[\bigoplus_{i=1}^{n} q_{Ki}\right] \tag{1}$$

представляет собой разделимую декомпозицию, в которую входят искомые функция соответствия

$$r(q) = \bigoplus_{i=1}^{n} r_i(q_i) \tag{2}$$

и вектор состояния

$$q_K = \bigoplus_{i=1}^{n} q_{Ki}. \tag{3}$$

Решающие функции, построенные двумя другими способами, преобразовать в разделимые декомпозиции, подобные (1), невозможно, так как в них обязательно присутствуют конъюнкции, содержащие логические произведения вида $r_i(q_i)\,\&\,q_{Kj}$, в которых $i \ne j$ [11]–[13].

Поскольку функция (2) скалярна, $\#Q_{Ki} = 2$ и блок памяти контрольного автомата A_K содержит один элемент. Если он представляет собой элемент задержки на такт (*D*-триггер), A_K легко реализуется в форме логической задержки [6], причем ввиду линейности такого элемента памяти его функция переходов имеет вид суммы по модулю два функций переходов всех A_{Ki}:

$$\delta_K(x_K) = \bigoplus_{i=1}^{n} \delta_{Ki}(x_{Ki},\, q_{Ki}). \tag{4}$$

Функция переходов (4) не зависит от собственных состояний A_{Ki}, что является следствием его реализации в форме логической задержки. Ее аргумент x_K представляет собой двоичный вектор, образованный объединением векторов входов и состояний всех КА сети, причем если векторы входов x_{Ki} состоят из компонентов входов и состояний сети и априори известны, то состояния КА q_{Ki} формируются в совокупности средств диагностирования автоматов сети и с текущими состояниями сети связаны неявно. В соответствии с постановкой задачи эту связь надо трансформировать в явную форму, для чего достаточно учесть, что при отсутствии ошибок равенство $q_{Ki} = r_i(q_i)$ справедливо для всех пар (A_i, A_{Ki}) одновременно. Преобразовав (4) в соответствии с этим равенством, получим выражение для функции переходов автомата A_K:

$$\delta_K(x_K) = \bigoplus_{i=1}^{n} \delta_{Ki}\left[x_{Ki}, r_i(q_i)\right]. \tag{5}$$

Равенства (3) и (5) полностью задают КА A_K в форме логической задержки для всей сети. Равенство (2) определяет вычислитель функции соответствия в составе соответствующего дискриминатора ошибки *D*, его устройство сравнения вырождается в двухвходовой сумматор по модулю два. Структура дискриминатора не отличается от представленной на рис. 2.

Таким образом, задача ФД сети *S* для рассматриваемого случая решена. Помимо ошибок в единственном компоненте сети, построенные средства диагностирования обнаруживают ошибки заданного класса, происходящие одновременно в любой нечетной совокупности ее компонентов, поскольку решающая функция (1) принимает единичное значение при нечетном числе единичных функций $\varepsilon_i\left[r_i(q_i), q_{Ki}\right]$.

В общем случае разбить множества состояний компонентов сети на два блока так, чтобы при появлении ошибок происходила смена блока, не удается и число блоков приходится увеличивать. Функции соответствия $\mathbf{r}_i(q_i)$ при этом становятся векторными с размерностями $m_i \ge \left]\log_2 k_i\right[$, где $]\cdot[$ – функция округления аргумента до ближайшего большего целого числа; k_i – число блоков описанного разбиения. Такая ситуация возникает при необходимости обнаружения многократных ошибок в компонентах сети и в общем случае задания класса ошибок списком [14], [15]. Покажем, как, используя полученный ранее результат, можно решить задачу ФД сети из автоматов состояний и в этом случае.

Пусть для автомата A_i в составе сети определена векторная функция соответствия $\mathbf{r}_i(q_i)$ с размерностью $m_i \ge 2$. Она представима совокупностью скалярных функций:

$$\mathbf{r}_i(q_i) = \left\{r_{i0}(q_i), r_{i1}(q_i), \ldots, r_{ij}(q_i), \ldots, r_{i(m_i-1)}(q_i)\right\}, \tag{6}$$

где $r_{ij}(q_i)$ – булевы функции, нумерация которых, вообще говоря, произвольна.

Из структуры ФД (рис. 2) следует, что размерность двоичных векторов состояний $\mathbf{q}_{Ki}$ равна m_i, нумерация их разрядов совпадает с нумерацией булевых функций в $r_{ij}(q_i)$, и при отсутствии ошибок всегда справедливо равенство $r_{ij}(q_i) = q_{Kij}$. Это равенство и соотношение (6) позволяют определить решающую функцию для рассматриваемого компонента сети как логическую сумму вида

$$\varepsilon_i(q_i, q_{Ki}) = \bigvee_{j=0}^{m_i-1}\left[r_{ij}(q_i) \oplus q_{Kij}\right],$$

поскольку появление ошибки изменяет значение хотя бы одной скалярной функции в $\mathbf{r}_j(q_i)$.

Класс ошибок E_i, обнаруживаемых в автомате A_i, представляет собой объединение подклассов E_{ij}, состоящих из ошибок, искажающих соответствующие булевы функции $r_{ij}(q_i)$ в $\mathbf{r}_i(q_i)$. Поэтому класс обнаруживаемых ошибок сети S из n автоматов есть

$$E=\bigcup_{i=1}^{n}E_i=\bigcup_{i=1}^{n}\left(\bigcup_{j=0}^{m_i-1}E_{ij}\right). \quad (7)$$

Выберем из (7) n подклассов E_{i0} и образуем класс ошибок $E_0=\bigcup_{i=1}^{n}E_{i0}\subset E.$ Очевидно, что для обнаружения в сети S ошибок такого класса можно использовать n автоматов $A_{\text{К}i0}$, полученных выделением из $A_{\text{К}i}$ компонентов с $j=0$ $q_{\text{К}i0}$. В качестве функций соответствия при этом выступают скалярные компоненты $r_{i0}(q_i)$ функций $\mathbf{r}_i(q_i)$, а в качестве решающих – функции $\varepsilon_{i0}=r_{i0}(q_i)\oplus q_{\text{К}i0}$.

Таким образом, задача построения средств ФД для обнаружения ошибок из E_0 сведена к рассмотренной ранее, что позволяет, используя (2), (3) и (5), найти

$$r_0(q)=\bigoplus_{i=1}^{n}r_{i0}(q_i),\quad q_{\text{К}0}=\bigoplus_{i=1}^{n}q_{\text{К}i0},$$

$$\delta_{\text{К}0}(x_\text{К})=\bigoplus_{i=1}^{n}\delta_{\text{К}i0}\left[x_{\text{К}i},r_{i0}(q_i)\right].$$

Первое соотношение можно трактовать как нулевой компонент искомой векторной функции соответствия $\mathbf{r}(q)$, а два других как нулевой разряд вектора состояния синтезируемого $A_\text{К}$ и нулевой компонент его функции переходов $\boldsymbol{\delta}_\text{К}(x_\text{К})$.

Определив аналогично классы ошибок E_1, E_2, ..., найдем следующие компоненты функции $\mathbf{r}(q)$, вектора $\mathbf{q}_\text{К}$ и функции $\boldsymbol{\delta}_\text{К}(x_\text{К})$. Если размерности всех функций $\mathbf{r}_i(q_i)$ одинаковы $(m_i=m)$, то последним будет класс $E_{(m-1)}$, равенство (7) преобразуется к виду $E=\bigcup_{j=1}^{m-1}E_j$, а соотношения, задающие $A_\text{К}$ и D, определятся как

$$\mathbf{r}(q)=\Big\{r_0(q)=\bigoplus_{i=1}^{n}r_{i0}(q_i),\ldots,$$
$$r_j(q)=\bigoplus_{i=1}^{n}r_{ij}(q_i),\ldots,r_{(m-1)}(q)=\bigoplus_{i=1}^{n}r_{i(m-1)}(q_i)\Big\}; \quad (8)$$

$$\mathbf{q}_\text{К}=\Big\{q_{\text{К}0}=\bigoplus_{i=1}^{n}q_{\text{К}i0},\ldots,$$
$$q_{\text{К}j}=\bigoplus_{i=1}^{n}q_{\text{К}ij},\ldots,q_{\text{К}(m-1)}=\bigoplus_{i=1}^{n}q_{\text{К}i(m-1)}\Big\}; \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\delta}_\text{К}(x_\text{К})=\Big\{\delta_{\text{К}0}(x_\text{К})=\bigoplus_{i=1}^{n}\delta_{\text{К}i0}\left[x_{\text{К}i},r_{i0}(q_i)\right],\ldots,$$
$$\delta_{\text{К}j}(x_\text{К})=\bigoplus_{i=1}^{n}\delta_{\text{К}ij}\left[x_{\text{К}i},r_{ij}(q_i)\right],\ldots,$$
$$\delta_{\text{К}(m-1)}(x_\text{К})=\bigoplus_{i=1}^{n}\delta_{\text{К}i(m-1)}\left[x_{\text{К}i},r_{i(m-1)}(q_i)\right]\Big\}; \quad (10)$$

$$\varepsilon(q,q_\text{К})=\bigvee_{j=0}^{m-1}\left[r_j(q)\oplus q_{\text{К}j}\right]. \quad (11)$$

Если же размерности функций $\mathbf{r}_i(q_i)$ различны, пользоваться полученными соотношениями для синтеза $A_\text{К}$ и D тоже можно после некоторой коррекции. Во-первых, во всех формулах следует приравнять m максимальному значению из m_i. Во-вторых, нужно иметь в виду, что определенные подклассы ошибок E_{ij} при $j\geq m_i$ пусты, поэтому необходимо для $j\geq m_i$ либо положить в (8)–(10) $r_{ij}(q_i)$, $q_{\text{К}ij}$ и $\delta_{\text{К}ij}\left[x_{\text{К}i},r_{ij}(q_i)\right]$, соответственно, равными нулю, либо исключить их из суммирования по модулю два.

Размерность построенного $A_\text{К}$ равна максимальной размерности $A_{\text{К}i}$, $\max(m_i)$, и в рамках принятой постановки задачи дальнейшее снижение аппаратурных затрат на реализацию ФД сети возможно только за счет минимизации логических многополюсников, вычисляющих $\mathbf{r}(q)$ и $\boldsymbol{\delta}_\text{К}(x_\text{К})$.

Можно показать, что и в случае векторных функций соответствия устройство ФД, построенное предложенным методом, обнаруживает в реальном масштабе времени ошибки в любой нечетной совокупности компонентов сети. Более того, при использовании решающей функции (11) обнаруживаются ошибки и в некоторых совокупностях, содержащих четное их число.

Пример. Построим средства ФД, предназначенные для обнаружения однократных ошибок в устройстве обработки дальномерного сигнала, представляющем собой цифровой декодер пятиразрядного кода Баркера (рис. 3). Анализируя его, установим, что в части, формирующей импульс дальности DIM, устройство является сетью из пяти автоматов состояний: четырех десятиразрядных

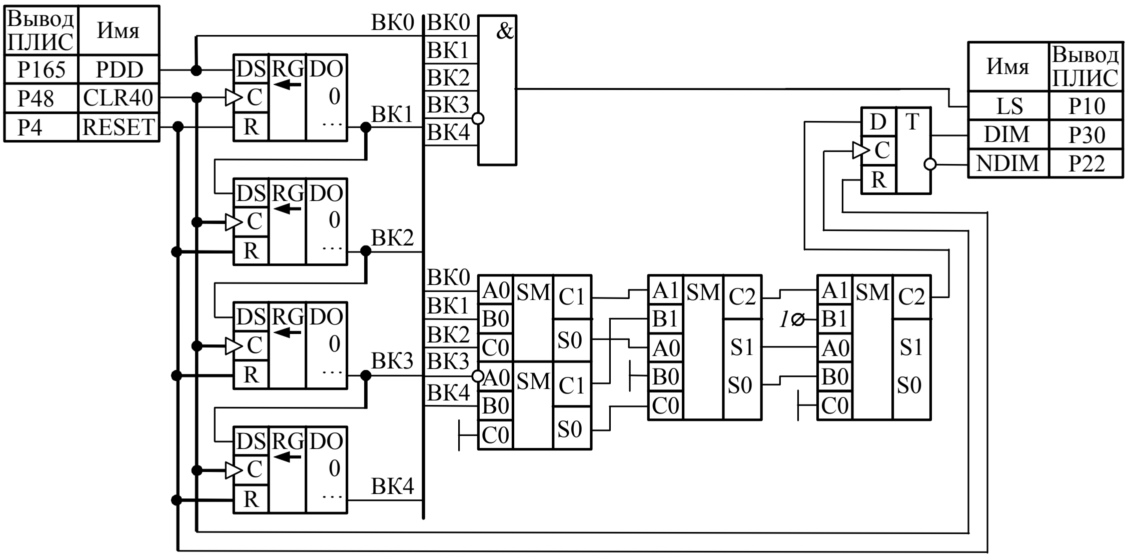

Рис. 3

регистров сдвига и блока арифметических сумматоров с триггером на выходе.

Построим средства ФД, обнаруживающие однократную ошибку в сети. Учитывая, что блок сумматоров контролируется дублем [6], упростить средства ФД можно только для регистров сдвига.

Построенные традиционным способом средства ФД для регистров сети состоят из четырех КА с дискриминаторами ошибок. Каждый автомат содержит десятивходовой сумматор по модулю два и D-триггер, а каждый дискриминатор – такой же сумматор плюс двухвходовой сумматор, формирующий сигнал ошибки ε. Используя свойства суммы по модулю два, заменим эти сумматоры десятивходовым и трехвходовым и получим средства ФД как совокупность из четырех десятивходовых, четырех трехвходовых и четырех двухвходовых сумматоров по модулю два, четырех двухвходовых схем "И", одной четырехвходовой схемы "ИЛИ" и четырех триггеров.

При решении задачи ФД методом, предложенным в настоящей статье, дискриминатор ошибок сети состоит из двух сумматоров по модулю два: сорокавходового, суммирующего все выходы регистров, и двухвходового, формирующего сигнал ошибки.

Для нахождения контрольного автомата сети найдем его функцию переходов:

$$\delta_{SK}(q) = \sum_{i=1}^{4} \delta_{Ki}(q) =$$

$$= \overline{R}\left[\sum_{i=0}^{9} q_{1i} \oplus \sum_{i=0}^{9} q_{2i} \oplus \sum_{i=0}^{9} q_{3i} \oplus \sum_{i=0}^{8} q_{4i} \oplus \text{ВК0}\right],$$

где $\delta_{Ki}(q)$ – функции переходов КА для каждого регистра; $\overline{R}$ – инверсия сигнала сброса; $q_{1i}, \ldots, q_{4i}$ – разряды векторов состояний регистров.

Таким образом, для реализации КА потребуется четыре десятивходовых и один четырехвходовой сумматоров (в совокупности образуют сорокавходовой), комбинационный элемент "И" и один триггер.

Заменив по аналогии с традиционным решением два сорокавходовых сумматора совокупностью из одного сорокавходового и одного трехвходового, получим средства ФД сети, состоящие из четырех десятивходовых, одного четырехвходового, одного трехвходового и одного двухвходового сумматоров по модулю два, одной двухвходовой схемы "И" и одного триггера (рис. 4).

Сложность логической части полученных средств ФД по сравнению с традиционными при оценке ее по критерию Мак-Класки [13] сокращена более чем на 30 %, а память уменьшена в 4 раза.

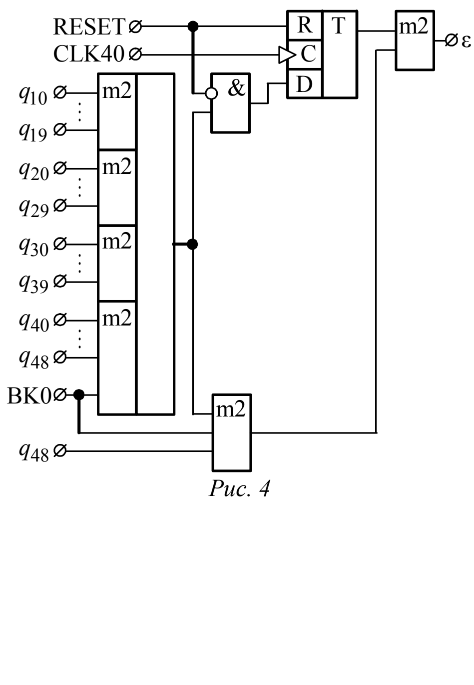

Рис. 4

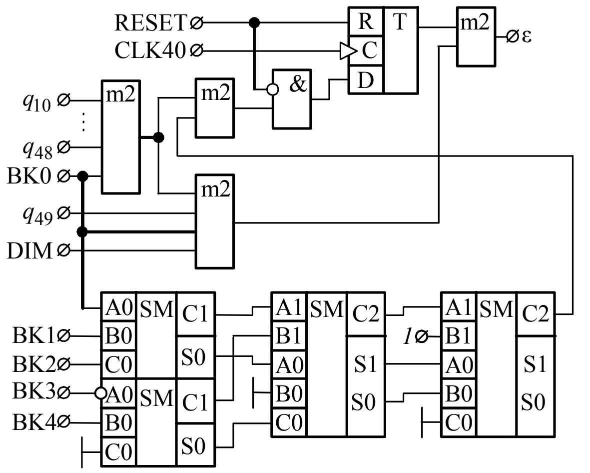

Рис. 5

Синтезированные средства ФД обнаруживают ошибки нечетной кратности только в регистрах сети. Охватить контролем входящий в ее состав блок сумматоров можно с помощью несложного преобразования полученной схемы. Для этого достаточно функцию переходов ее КА заменить суммой по модулю два этой функции и функции переходов выходного триггера блока сумматоров, а трехвходовой сумматор по модулю два в ее составе преобразовать в четырехвходовой, подав на добавочный вход сигнал DIM. В результате получатся средства ФД для всей сети (рис. 5). Причины их существенного усложнения по сравнению с предыдущими указаны ранее.

Таким образом показано, что предложенный подход к решению задачи ФД для сетей из автоматов состояний позволяет как снизить трудоемкость синтеза, так и уменьшить аппаратурные затраты на средства диагностики.

Заключение. Завершая настоящую статью, можно констатировать, что с диагностической точки зрения задача ФД сети, состоящей из ЦА состояний, решена. По мнению авторов, дальнейшие исследования целесообразно вести по трем направлениям. Во-первых, можно рассмотреть задачу ФД применительно к сетям не из автоматов состояний, а из автоматов общего вида. Во-вторых, можно снять требование реализации КА сети в форме логической задержки. Как показано в [6], в ряде случаев это может существенно упростить логический многополюсник, формирующий его функцию переходов. Особенно большой выигрыш ожидается, если функция соответствия сети порождает разбиение со свойством подстановки на множестве ее состояний. В-третьих, представляет интерес задача построения средств ФД не только для обнаружения ошибок в сети, но и для их локализации, т. е. указания компонента, работающего неправильно. Авторы надеются в обозримом будущем решить хотя бы часть из перечисленных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hartmanis J., Stearns R. The Algebraic Structure Theory of Sequential Machines. New York: Prentice Hall, 1966. 211 p.

2. Пархоменко П. П., Согомонян Е. С. Основы технической диагностики: в 2 кн. Кн. 2: Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства/ под ред. П. П. Пархоменко. М.: Энергия, 1981. 320 с.

3. Isidori A. Nonlinear Control Systems. London: Springer, 1995. 549 p.

4. Patton R., Clark R., Frank P. Fault Diagnosis in Dynamic Systems: Theory and Application. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1989. 594 p.

5. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical Review on Reconfigurable Fault-Tolerant Systems // Annu. Rev. Control. 2008. Vol. 32, № 2. P. 229–252.

6. Подкопаев Б. П. Алгебраическая теория функционального диагностирования динамических систем: в 2 ч. Ч. 2: Системные алгебры, алгебраическая модель функционального диагностирования, реализация модели функционального диагностирования. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 132 с.

7. Measurement Feedback Disturbance Decoupling in Discrete-Time Nonlinear Systems / A. Kaldmäe, Ü. Kotta, A. Shumsky, A. Zhirabok // Automatica. 2013. Vol. 49, № 9. P. 2887–2891.

8. Katz R. Max-Plus (A,B)-invariant Spaces And Control of Timed Discrete-Event Systems // IEEE Trans. on Automatic Control. 2007. Vol. 52, № 2. P. 229–241.

9. Щербаков Н. С., Подкопаев Б. П. Структурная теория аппаратного контроля цифровых автоматов. М.: Машиностроение, 1982. 191 с.

10. Measurement Feedback Disturbance Decoupling In Discrete-Event Systems / A. Kaldmäe, Ü. Kotta, A. Shumsky, A. Zhirabok // Int. J. Robust Nonlinear Control. 2015. Vol. 25, № 17. P. 3330–3348.

11. Миллер Р. Теория переключательных схем: в 2 т. Т. 1. М.: Наука, 1970. 416 с.

12. Cheng D. Disturbance decoupling of boolean control networks // IEEE Trans. on Automatic Control. 2011. Vol. 56, № 10. P. 2–10.

13. Yang M., Li R., Chu T. Controller Design for Disturbance Decoupling of Boolean Control Networks // Automatica. 2013. Vol. 49, № 1. P. 273–277.

14. Подкопаев Б. П. Алгебраическая теория функционального диагностирования динамических систем: в 2 ч. Ч. 1: Системы, диагностирование систем, системные алгебры. СПб.: Элмор, 2007. 132 с.

15. Shumsky A., Zhirabok A. Nonlinear Diagnostic Filter Design: Algebraic and Geometric Points of View // Int. J. of Applied Mathematics and Computer Science. 2006. Vol. 16, № 1. P. 101–113.

Статья поступила в редакцию 6 января 2018 г.

Быстрова Ирина Валентиновна – магистр техники и технологий по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (2015), аспирантка кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – техническая диагностика систем радиолокации и радионавигации.
E-mail: irinavalentinovn@yandex.ru

Подкопаев Борис Павлович – доктор технических наук (2011), профессор (2012) кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – математическая теория систем; техническая диагностика и надежность систем радиолокации и радионавигации.
E-mail: bpodkopaev@mail.ru

REFERENCES

1. Hartmanis J., Stearns R. The Algebraic Structure Theory of Sequential Machines. New York, Prentice Hall, 1966, 211 p.

2. Parkhomenko P. P., Sogomonyan E. S. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki. V 2 kn. Kn. 2: Optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnyye sredstva* [Fundamentals of Technical Diagnostics. Book 2: Optimization of Diagnostic Algorithms, Hardware Tools; ed by P. P. Parkhomenko]. Moscow, *Energiya*, 1981, 320 p. (In Russian)

3. Isidori A. Nonlinear Control Systems. London, Springer, 1995, 549 p.

4. Patton R., Clark R., Frank P. Fault Diagnosis in Dynamic Systems: Theory and Application. Englewood Cliffs, NJ, USA, Prentice-Hall, 1989, 594 p.

5. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical Review on Reconfigurable Fault-Tolerant Systems. Annu. Rev. Control. 2008, vol. 32, no. 2, pp. 229–252.

6. Podkopayev B. P. *Algebraicheskaya teoriya funktsional'nogo diagnostirovaniya dinamicheskikh sistem. V 2 ch. Ch. 2: Sistemnye algebry, algebraicheskaya model' funktsional'nogo diagnostirovaniya, realizatsiya modeli funktsional'nogo diagnostirovaniya* [Algebraic Theory of Functional Diagnosis of Dynamic Systems. Pt. 2: System Algebras, Algebraic Model of Functional Diagnosis, Realization of the Functional Diagnosis Model]. SPb, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2013, 132 p. (In Russian)

7. Kaldmäe A., Kotta Ü., Shumsky A., Zhirabok A. Measurement Feedback Disturbance Decoupling in Discrete-Time Nonlinear Systems. Automatica. 2013, vol. 49, no. 9, pp. 2887–2891.

8. Katz R. Max-Plus (A,B)-invariant Spaces And Control of Timed Discrete-Event Systems. IEEE Trans. on Automatic Control. 2007, vol. 52, no. 2, pp. 229–241.

9. Shcherbakov N. S., Podkopayev B. P. *Strukturnaya teoriya apparatnogo kontrolya tsifrovykh avtomatov* [Structural Theory of Digital Automation Hardware Control] Moscow, *Mashinostroyeniye*, 1982, 191 p. (In Russian)

10. Kaldmäe A., Kotta Ü., Shumsky A., Zhirabok A. Measurement Feedback Disturbance Decoupling In Discrete-Event Systems. Int. J. Robust Nonlinear Control. 2015, vol. 25, no. 17, pp. 3330–3348.

11. Miller R. F. Switching Theory. Vol. 1. Combinatorial Circuits. N. Y., 1965, 416 p.

12. Cheng D. Disturbance Decoupling of Boolean Control Networks. IEEE Trans. on Automatic Control. 2011, vol. 56, no. 10, pp. 2–10.

13. Yang M., Li R., Chu T. Controller Design for Disturbance Decoupling of Boolean Control Networks. Automatica. 2013, vol. 49, no. 1, pp. 273–277.

14. Podkopayev B. P. *Algebraicheskaya teoriya funktsional'nogo diagnostirovaniya dinamicheskikh sistem. CH. 1: Sistemy, diagnostirovaniye sistem, sistemnyye algebry* [Algebraic Theory of Functional Diagnosis of Dynamic Systems. Part 1: Systems, Diagnostic Systems, System Algebras]. SPb, *Elmor*, 2007, 132 p. (In Russian)

15. Shumsky A., Zhirabok A. Nonlinear Diagnostic Filter Design: Algebraic and Geometric Points of View. Int. J. of Applied Mathematics and Computer Science. 2006, vol. 16, no. 1, pp. 101–113.

Received January, 06, 2018

Irina V. Bystrova – Master's Degree in Infocommunication Technologies and Communication systems (2015), postgraduate student of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". Area of expertise: technical diagnostics of radiolocation and radio navigation systems.
E-mail: irinalentinovn@yandex.ru

Boris P. Podkopaev – D. Sc. in Engineering (2011), Professor (2012) of the Department of Radio Equipment Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: mathematical theory of systems, technical diagnostics and reliability of radiolocation and radio navigation systems.
E-mail: bpodkopaev@mail.ru